

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.06.001

长潭水库沉积物磷分布特征及污染成因分析

王沛芳^{1,2}, 陆海波^{1,2}, 王超^{1,2}, 常虹³, 钱进^{1,2}, 侯俊^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098;
2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 3. 江苏省水利工程规划办公室, 江苏南京 210029)

摘要: 为揭示深水湖库沉积物磷的分布特征, 运用沉积物磷形态标准分析法 SMT, 于 2011 年 10 月至 2012 年 7 月对长潭水库库区 5 个采样点沉积物中的 TP 和各形态磷含量进行了分析。结果表明: 长潭水库沉积物处于还原状态, 有利于 Fe/Al-P 的还原溶解, 其中中下游还原性比上游强, 夏季还原性最强。沉积物含水率和 TOC 质量比上游较低, 中下游较高; 春季和夏季沉积物中 TOC 质量比较高。长潭水库 TP 质量比平均值在 0.56 ~ 0.79 mg/g 之间, 其空间分布特征是中游较高, 上游和下游较低。其中, Fe/Al-P 在 TP 中占 27% ~ 48%, 平均为 41%, Ca-P 在 TP 中占 16% ~ 25%, 平均为 19%, OP 在 TP 中占 35% ~ 52%, 平均为 40%。可见, 各形态磷中 Fe/Al-P 所占百分比最大, 有利于水体中藻类吸收利用。长潭水库沉积物磷污染主要来源为上覆水体中磷的沉降。

关键词: 沉积物; 磷形态; 分布特征; 长潭水库

中图分类号: X713 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)06-0471-06

Distribution characteristics and causes of pollution of phosphorus in sediments of Changtan Reservoir

WANG Peifang^{1,2}, LU Haibo^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, CHANG Hong³, QIAN Jin^{1,2}, HOU Jun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Jiangsu Water Conservancy Planning Bureau, Nanjing 210029, China)

Abstract: The total phosphorus (TP) and various forms of phosphorus in surface sediments were measured by the sediment phosphorus form analysis method of the standard measurement and test (SMT) during the period from October 2011 to July 2012 at five sampling sites in the Changtan Reservoir, in order to explore the distribution characteristics of phosphorus in the sediments of deep lakes and reservoirs. The results show that the sediments of the Changtan Reservoir were in restoration conditions, especially in the middle and lower reaches and in the summer. The water contents in the sediments and the TOC content were low in the upper reaches and high in the middle and lower reaches. The TOC content was high in the spring and summer. The average value of the TP content in the Changtan Reservoir ranged from 0.56 to 0.79 mg/g, with a spatial distribution of relatively higher levels in the middle reaches and lower levels in the upper and lower reaches. The content of Fe/Al-bound phosphorus (Fe/Al-P) ranged from 27% to 48% of TP, with an average value of 41%. The content of Ca-bound phosphorus (Ca-P) ranged from 16% to 25% of TP, with an average value of 19%. The content of organic phosphorus (OP) ranged from 35% to 52% of TP, with an average value of 40%. Fe/Al-P accounted for the highest content of all phosphorus forms, and it was available for algae in the water. The main source of phosphorus pollutants of the Changtan Reservoir was the settlement of overlying water.

Key words: sediments; phosphorus forms; distribution characteristics; Changtan Reservoir

收稿日期: 2013-04-15

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201101020); 江苏省杰出青年基金(BK2012037); 中央高校基本科研业务费专项(2012B06314)

作者简介: 王沛芳(1973—), 女, 河北保定人, 教授, 博士, 主要从事水环境保护与生态修复研究。E-mail: pfwang2005@hhu.edu.cn

通信作者: 王超, 教授。E-mail: cwang@hhu.edu.cn

沉积物经过长期、复杂的沉积物-水界面交换后,容纳了不同种类和数量的污染物,对水环境和生态系统形成了潜在的威胁,是水环境保护与生态修复中亟待研究的领域^[1]。在外源污染得到一定控制的情况下,作为内源污染的沉积物对上覆水体氮磷含量的贡献使之成为上覆水体的重要营养源之一。水体中磷酸盐含量和沉积物的潜在释放有关,浅水湖泊水体中磷酸盐的来源可能与内源性磷关系更大^[2]。磷元素是藻类和浮游生物生长必需的营养元素之一,其含量的增加对藻类和浮游生物的生长起促进作用,是水体富营养化的主要因素之一。沉积物中的磷元素对上覆水体中磷含量起缓冲作用,随着水环境理化特性条件的改变,沉积物中的磷元素溶解进入间隙水中,进而通过水力扩散作用,释放于上覆水体中^[3]。磷的赋存形态决定了沉积物向水体释放磷元素的能力以及生物可利用磷的含量^[4-6]。

长潭水库位于广东省蕉岭县长潭镇,水库集水面积为 1 990 km²,总库容 17 200 万 m³,是一座以发电为主,兼有防洪、灌溉、供水、旅游等功能的大型水库。近年来,水库已呈现明显的富营养化趋势。虽然相关部门已采取措施,上游的点源污染得到了一定的控制,水库周边城镇生活、农业面源污染也有所减少,但是每年 5—9 月水库蓝藻依然持续暴发,因此水库内源污染的贡献不容忽视。为准确掌握长潭水库沉积物污染状况,本文通过采集库区上下游 5 个断面的沉积物样品,分析了 2011 年秋季至 2012 年夏季 4 次采样样品沉积物理化特性及沉积物中磷的含量水平、形态特征及分布特点,讨论了沉积物中磷向上覆水体迁移的可能,旨在为控制水库磷含量与蓝藻暴发提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

1.1.1 采样点的布置

以 2011 年 10 月和 12 月、2012 年 4 月和 7 月分别作为秋、冬、春、夏四季的代表月对广东长潭水库库区从上游至下游设置的 5 个采样断面进行采样,并用便携式全球定位系统(GPS)导航定位。5 个采样点分布于水库几个具有代表性的断面,可代表长潭水库上中下游沉积物污染状况,具体位置见图 1。

1.1.2 样品处理

采用不锈钢抓斗式采泥器采集表层沉积物样品,去除底栖动物和沙石,装自封袋密封保存,带回实验室冷冻干燥后研磨,用 200 目过筛密闭保存待用。

1.2 沉积物的基本理化指标测定

沉积物的理化指标包括 pH、氧化还原电位(ORP)、电导率(EC)、含水率和总有机碳(TOC)等。pH 和 ORP 用 SHKY ORP-412 便携式氧化还原电位测定仪现场测定;EC 采用电导率仪现场测定;称取 5 g 左右的沉积物鲜样,105 ℃烘干后计算得到沉积物含水率;TOC 值用 Elementar liquiTOC 仪测定。

1.3 磷形态测定分析

采用淡水沉积物磷形态标准分析法 SMT 法对沉积物中的磷形态进行分析测定^[7],将沉积物中的磷形态分为铁铝磷(Fe/Al-P)、钙磷(Ca-P)、无机磷(IP)、有机磷(OP)和总磷(TP)。每个样品做 3 个平行样,取平均值进行分析。

2 结果与讨论

2.1 沉积物理化特性分析

沉积物理化特征是沉积物中的磷向水体释放潜在能力的基础。长潭水库沉积物理化指标值见表 1。

长潭水库的 ORP 值在-40 ~ 46 mV 之间,秋季、冬季和春季的 ORP 值主要在 20 ~ 46 mV 之间,夏季在-23 ~ -8 mV 之间。ORP 值能够反映沉积物的宏观氧化还原特性,ORP 值越高,氧化性越强;反之,还原性越强^[8-9]。在还原条件下,即 ORP 值降低时,铁、铝结合态磷容易因 Fe³⁺被还原溶解而释放到水体中;在氧化条件下,即 ORP 值升高时,水体中铁、铝结合态磷容易因 Fe²⁺被氧化而沉淀到沉积物中^[10]。长潭水库沉积物的氧化还原特性是秋冬春三季为



图 1 沉积物采样点分布
Fig. 1 Distribution of sediment sampling sites

表 1 沉积物理化指标值

Table 1 Physical and chemical indicators of sediments

时间	采样点	pH	ORP 值/ mV	泥温/ ℃	电导率/ (S·cm ⁻¹)	含水率/%	ω(TOC)/ (mg·g ⁻¹)
2011 年 10 月	S1	7.23	35.9	23.4	52.5	28.0	7.38
	S2	7.19	31.5	22.9	63.5	34.1	13.94
	S3	7.10	19.2	22.8	79.9	63.5	16.44
	S4	7.08	4.1	22.8	45.5	68.9	12.30
	S5	7.10	-40.0	22.7	39.9	67.7	18.19
2011 年 12 月	S1	7.5	45.6	16.5	56.7	33.0	13.44
	S2	7.26	36.0	17.8	79.0	38.1	13.5
	S3	6.81	32.4	17.5	98.5	66.0	15.7
	S4	7.05	28.7	19.7	83.2	72.3	13.29
	S5	7.10	25.3	19.7	66.7	63.6	12.46
2012 年 4 月	S1	7.32	37.2	22.3	73.2	28.2	11.52
	S2	7.25	34.3	22.1	78.7	30.5	15.00
	S3	6.73	33.1	19.2	82.7	60.9	17.30
	S4	6.87	26.4	20.1	88.9	68.6	18.78
	S5	7.12	28.4	20.1	72.1	66.4	15.64
2012 年 7 月	S1	6.88	-8.4	27.3	48.3	33.1	10.32
	S2	6.65	-12.7	26.5	50.6	34.6	13.49
	S3	6.60	-15.6	31.0	69.6	72.2	21.70
	S4	6.30	-17.2	30.6	66.5	72.4	16.13
	S5	7.32	-23.0	28.8	57.1	69.9	17.28

弱还原性,夏季为还原性,铁、铝结合态磷最易被还原溶解而释放到上覆水体中参与水力循环。按空间分布来看,水库中下游地区的还原性比上游强,对中下游沉积物中的磷释放有更大影响。

长潭水库沉积物含水率在 28% ~ 73% 之间,4 个季节的含水率相差不大;上游采样点 S1 和 S2 含水率较低,小于 40%,根据观察,与上游沉积物偏沙质有较大的关系;中下游采样点 S3,S4 和 S5 含水率较高,大于 60%,中下游沉积物容易受水库的异重流影响而再悬浮。根据长潭水库上游流速快、中下游流速减缓的特点,上游含水率较低可能与上游流速较快、沉积物含沙量较大有一定关系。

本文对 TOC 含量的分析结果表明,长潭水库沉积物中有机物质量比范围为 7.38 ~ 21.7 mg/g,中游、下游比较高,上游较低。以 7 月为例,中游和下游 TOC 质量比为 15.7 ~ 21.7 mg/g,上游为 7.38 ~ 13.5 mg/g。同时 2011 年 4 月和 7 月沉积物中 TOC 质量比平均值比 2012 年 10 月和 12 月高,四季 TOC 质量比从高到低排序,依次为夏季、春季、秋季、冬季,说明春夏两季长潭水库沉积物中的有机物含量比秋冬季节要高,原因是春夏季节水体中悬浮物有机质的含量较高,悬浮物沉积在底部造成沉积物中有机质含量变高。

另外,浅水湖泊水力波动对沉积物-水界面作用效果强烈,磷在沉积物与水体间的交换比较剧烈;而深水湖泊和水库往往因为水深较大,水力波动不易对沉积物产生影响,影响了表层水和沉积物之间磷的交换能力,而且深水环境下,沉积物和底层水的溶解氧含量往往比较低,处于缺氧或者厌氧状态^[11]。长潭水库从上游至下游水深逐渐增大,水流逐渐减缓,因此从上游至下游沉积物的量、理化特性和磷的形态特征都会有相应的变化。

2.2 沉积物中 TP 分布特征

长潭水库 TP 质量比为 0.24 ~ 0.89 mg/g,2011 年 10 月和 12 月、2012 年 4 月和 7 月 4 个季节质量比的平均值分别为 0.56 mg/g,0.69 mg/g,0.79 mg/g 和 0.63 mg/g,其沉积物 TP 含量在国内湖泊河流中处于中等水平。长潭水库各采样点四季沉积物 TP 含量分布见图 2。从数据分析结果来看,TP 含量上游和下游相对较低,中游较高,S3 高于 S4 高于 S2 高于 S5 高于 S1。根据水体流速分布情况看,长潭水库上游水较浅,流速大,水力波动较大,不利于水中细颗粒悬浮物的沉积,沉积物吸附的磷含量较低;至中游时,由于流速减缓,吸附了大量磷的细颗粒悬浮物大量沉积;下游水体比较清澈,悬浮物浓度较小,其沉积减少,故而沉积物 TP 含量较低。另外中游有许多小支流汇入,一方面带来了比较丰富的悬浮物,另一方面水力汇集产生的顶托作用也使水体中沉积物大量沉积。

TP 质量比 2011 年 10 月为 0.24 ~ 0.75 mg/g,平均值为 0.56 mg/g;2011 年 12 月为 0.58 ~ 0.83 mg/g,平

均值为0.69 mg/g;2012 年 4 月为 0.66 ~ 0.89 mg/g,平均值为 0.79 mg/g;2012 年 7 月为 0.40 ~ 0.86 mg/g,平均值为 0.63 mg/g。4 个季节 TP 含量分布特征是春季沉积物中含量最大,秋季最小。由于 10 月后水体氮磷利用率不高,增加了水体中吸附磷的悬浮颗粒的沉积,而藻类的残体可固定部分磷^[6],故 10 月以后沉积物磷含量增高可能与藻类大量死亡沉积有关。夏季沉积物中磷含量比春季少,可能是由于夏季温度高,阳光充足,适宜蓝藻生长,蓝藻大量吸收水体中的磷^[12],而沉积物处于最利于向水体释放磷的还原条件下,向水体中释放补充磷元素的原因。

2.3 磷形态分布特征

长潭水库沉积物 4 个季节磷形态分布特征见图 3。根据磷形态分布特征的分析可知:Fe/Al-P 质量比为 0.07 ~ 0.40 mg/g,平均值约为 0.28 mg/g,Ca-P 质量比为 0.06 ~ 0.20 mg/g,平均值约为 0.12 mg/g,IP 质量比为 0.12 ~ 0.57 mg/g,平均值约为 0.40 mg/g,OP 质量比为 0.12 ~ 0.33 mg/g,平均值约为 0.26 mg/g。3 种主要形态的磷质量比大小排序依次为 Fe/Al-P,OP,Ca-P,可以看出 Fe/Al-P 和 OP 是沉积物磷的主要存在形态,分别占 TP 的 41% 和 40%。Fe/Al-P 是生物可利用磷的主要形式,来源于水体中正磷酸盐与铁铝氧化物的专性吸附,随着氧化还原条件的变化而在沉积物和上覆水体间迁移转化,可用于判断沉积物中磷的内源释放的能力,因此 Fe/Al-P 含量越高,磷向水体中释放的风险就较大。同时,长潭水库的深水环境有利于 OP 的累积^[13],因此沉积物中 OP 的含量也较高。OP 一般情况下生物利用有效性较低,但在有利的氧化条件下,也有较大的释放风险^[14]。对福建省山仔水库沉积物磷的研究表明^[15],其表层沉积物 TP 质量比为 0.6 ~ 1.0 mg/g,其中 Fe/Al-P 在 TP 中占 44% ~ 57%,Ca-P 占 13 ~ 26%,OP 占 27% ~ 40%,具有较大的释放磷的潜力。山仔水库和长潭水库都是河川型水库,由此推断长潭水库也有较大的磷释放潜能。

以 2012 年 7 月为例,Fe/Al-P 质量比为 0.12 ~ 0.4 mg/g,质量比从大到小按采样点排序依次为 S3,S4,

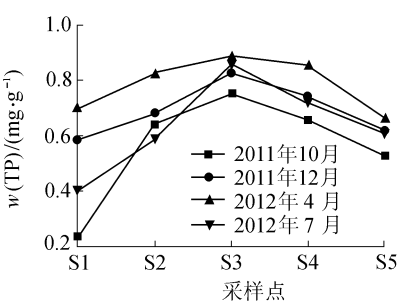


图 2 TP 质量比分布

Fig. 2 Distribution of total phosphorus content

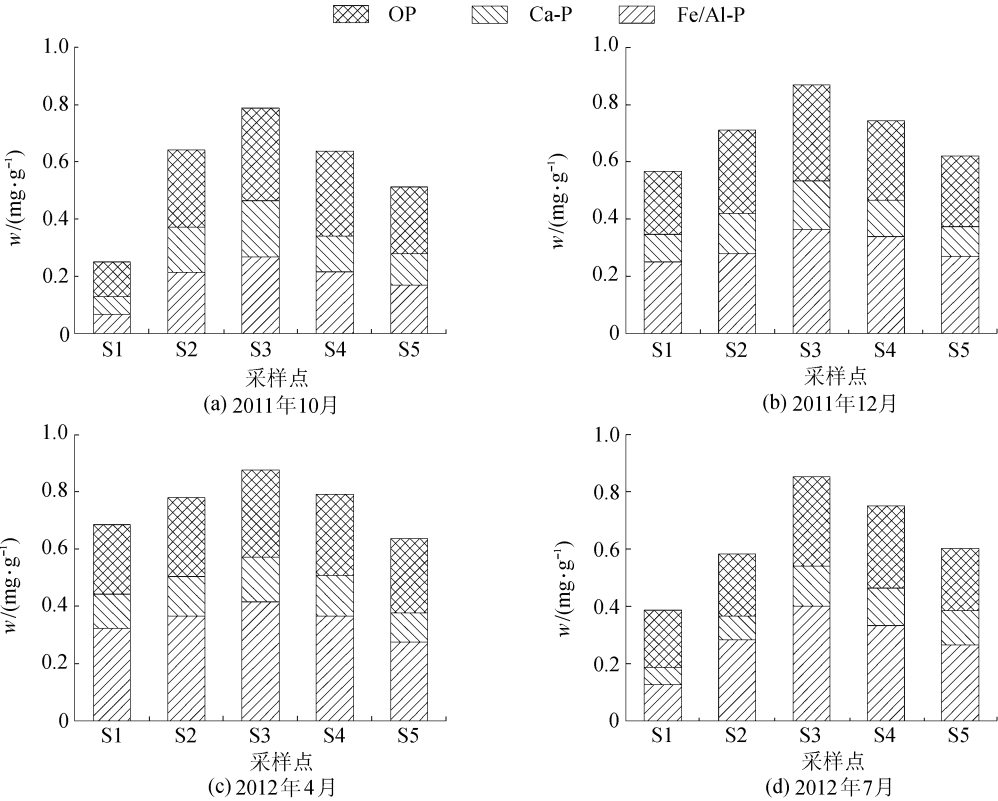


图 3 各种磷形态的质量比分布

Fig. 3 Distribution of contents of phosphorus forms

S2,S5,S1;Ca-P 质量比为 0.06~0.14 mg/g,质量比从大到小按采样点排序依次为 S3,S4,S5,S2,S1,OP 质量比范围为 0.2~0.31 mg/g,质量比从大到小按采样点排序依次为 S3,S4,S2,S5,S1。从分析结果来看,长潭水库沉积物磷各形态含量和 TP 分布特征 5 个断面比较相似,都是中游较大,上游和下游较低,由此可见,中游的沉积物内源释放磷的风险较大。

2011 年 10 月沉积物中的磷各形态质量比分别为 $w(\text{Fe/Al-P})=0.19\text{ mg/g}$, $w(\text{Ca-P})=0.13\text{ mg/g}$, $w(\text{OP})=0.25\text{ mg/g}$;2011 年 12 月分别为 $w(\text{Fe/Al-P})=0.30\text{ mg/g}$, $w(\text{Ca-P})=0.13\text{ mg/g}$, $w(\text{OP})=0.27\text{ mg/g}$;2012 年 4 月分别为 $w(\text{Fe/Al-P})=0.35\text{ mg/g}$, $w(\text{Ca-P})=0.13\text{ mg/g}$, $w(\text{OP})=0.27\text{ mg/g}$;2012 年 7 月分别为 $w(\text{Fe/Al-P})=0.28\text{ mg/g}$, $w(\text{Ca-P})=0.11\text{ mg/g}$, $w(\text{OP})=0.25\text{ mg/g}$ 。Fe/Al-P 质量比按季节分是春季大于冬季大于夏季大于秋季,夏季质量比较小可能与夏季还原性条件下利于 Fe/Al-P 向上覆水体中还原释放有关;Ca-P 质量比按季节分春季大于秋季大于冬季大于夏季,夏季 Ca-P 含量最低可能与沉积物的 pH 最低(表 1),对沉积物中 Ca-P 向水体中解吸、释放起促进作用^[16]有关;OP 质量比按季节分,冬季大于春季大于秋季大于夏季,这与沉积物中 TOC 的含量特征差异比较大有关系,其中原因有待进一步研究。

3 污染成因分析与讨论

长潭水库蓝藻暴发的主要污染因素是氮磷污染,而沉积物的磷污染主要来源是水体中的磷。水体中磷通过几种途径进入沉积物:一部分以固体颗粒态形式随径流进入水库,最终以物理沉降的形式沉积在底部;一部分以溶解态形式进入水库,然后通过吸附等方式与黏土等悬浮物一起沉降在水库底部;还有一部分磷在一定的条件下与钙、铁和铝等阳离子络合,反应生成沉淀物沉积在水库底部;另外磷还可以被藻类等水生生物吸收,以生物残体的形式固定于沉积物中^[6]。

根据观测调查,长潭水库水体污染源主要有上游来水、农村生活面源、农田面源、畜禽养殖、山林冲刷面源等几个方面。据调查,长潭水库水体水质较差与长潭水库入库水质有关,水库上游武平县境内养殖业的快速发展,导致大量养殖废水和生活污水经由中山河和中赤河排放,对长潭水库造成影响,是入库磷污染的主要来源。通过分析长潭水库的水质监测结果发现(见图 4),长潭水库正磷酸盐质量浓度为 0.03~0.05 mg/L,占 TP 含量的 38%~58%,为水体中磷的主要存在形式,也是沉积物中比较活跃的 Fe/Al-P 的主要来源。

同时,长潭镇属亚热带地区海洋性季风气候,雨量充沛,山林冲刷带来的大量森林腐殖质是沉积物有机质和氮磷的重要来源。

4 结 论

- a. 长潭水库沉积物的氧化还原特性为还原性,夏季还原性最强,夏季沉积物向水体中释放磷的风险最大;中下游沉积物含水率和 TOC 质量分数都比上游高,说明中下游沉积物中的磷更容易向水体释放。
- b. 长潭水库 TP 质量比在 0.23~0.9 mg/g 之间,平均值在 0.56~0.79 mg/g 之间。TP 表现为上游和下游质量比相对较低,中游质量比较高;夏季沉积物 TP 质量比比其他季节略有降低。
- c. 长潭水库沉积物中易于被水体中藻类等吸收利用的 Fe/Al-P 质量比最高,向水体释放磷元素的风险比较大;另外沉积物中的有机磷质量比也较高,是长潭水库水体中磷元素潜在的释放源;长潭水库中游沉积物磷内源释放的风险较大。
- d. 长潭水库沉积物磷污染的主要来源是上覆水体中磷的沉降,上覆水体的污染源为上游来水、农村生活面源、农田面源、畜禽养殖、山林冲刷面源等。

致谢:珠江流域委员会提供长潭水库流域资料,梅州市水文局在样品采集、水样测试等方面给予协助,高越超、王智源、杨迪、王永泉等同学参与了样品采集和室内实验方面的工作,在此一并致以衷心的感谢!

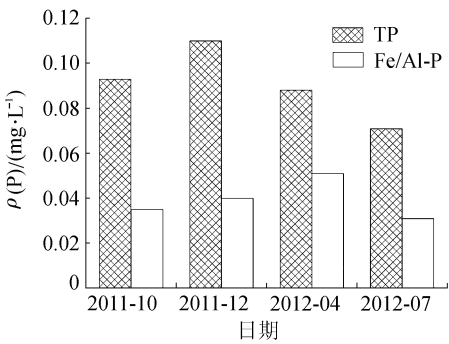


图 4 上覆水体中磷平均质量浓度
Fig. 4 Average content of phosphorus in overlying water

参考文献:

- [1] 王超,邹丽敏,王沛芳,等.典型城市浅水湖泊沉积物磷形态的分布及与富营养化的关系[J].环境科学,2008,29(5):1303-1307. (WANG Chao,ZOU Limin,WANG Peifang,et al. Relation between distribution of phosphorus form in the sediment of typical urban shallow lakes and eutrophication[J]. Environmental Science,2008,29(5):1303-1307. (in Chinese))
- [2] 张路,范成新,王建军,等.长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系[J].湖泊科学,2008,20(3):263-270. (ZHANG Lu,FAN Chengxin,WANG Jianjun,et al. Nitrogen and phosphorus forms and release risks of lake sediments from the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences,2008,20(3):263-270. (in Chinese))
- [3] LI Qingman,ZHANG Wen,WANG Xingxiang,et al. Phosphorus in interstitial water induced by redox potential in sediment of Dianchi Lake,China[J]. Pedosphere,2007,17(6):739-746.
- [4] 王超,冯士龙,王沛芳,等.污泥中磷的形态与生物可利用磷的分布及相互关系[J].环境科学,2008,29(6):1593-1597. (WANG Chao,FENG Shilong,WANG Peifang,et al. Distribution of phosphorus fractions and bio-available phosphorus forms and their relationships in sewage sludge[J]. Environmental Science,2008,29(6):1593-1597. (in Chinese))
- [5] DANIEL A S,TAKASHI A,MARTIN K. Phosphorus speciation in Myall Lake sediment,NSW,Australia[J]. Wetlands Ecol Manage,2009,17:85-91.
- [6] 高丽,周健民.磷在富营养化湖泊沉积物-水界面的循环[J].土壤通报,2004,35(4):512-515. (GAO Li,ZHOU Jianmin. Phosphorus cycle between sediments and water in Eutrophic lakes[J]. Chinese Journal of Soil Science,2004,35(4):512-515. (in Chinese))
- [7] RUBAN V,LOPEZ S,PARDO P,et al. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments-a synthesis of recent works[J]. Fresenius J Anal Chem,2001,370:224-228.
- [8] BOSTTROM B. Relations between chemistry,microbial biomass and activity in sediments of a polluted vs. a nonpolluted Eutrophic lake [J]. Verh Int Ver Limnol,1988,23:451-459.
- [9] 黎颖治,夏北成,谢小茜,等.沉积物-水界面磷交换模拟研究中环境因子的动态规律分析[J].中山大学学报:自然科学版,2007,46(3):117-121. (LI Yingzhi,XIA Beicheng,XIE Xiaoxi,et al. Dynamic rules for some environmental factors in the simulative experiment of phosphorus exchange at sediment-water interface [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2007,46(3):117-121. (in Chinese))
- [10] 朱兴旺,刘光逊,梁丽君,等.天津于桥水库沉积物理化特征及磷赋存形态研究[J].农业环境科学学报,2010,29(1):168-173. (ZHU Xingwang,LIU Guangxun,LIANG Lijun,et al. Physical-chemical characteristics and phosphorus speciation in the sediments of the Tianjin Yuqiao Reservoir[J]. Journal of Agro-Environment Science,2010,29(1):168-173. (in Chinese))
- [11] 朱元荣,张润宇,吴丰昌,等.贵州红枫湖沉积物生物可利用磷的分布特征及其与粒径的相互关系[J].湖泊科学,2010,22(4):513-520. (ZHU Yuanrong,ZHANG Runyu,WU Fengchang,et al. Distribution of bioavailable phosphorus and their relationship with particle size in sediments of Lake Hongfeng Guizhou Province[J]. Journal of Lake Sciences,2010,22(4):513-520. (in Chinese))
- [12] 谭香,沈宏,宋立荣.三种水华蓝藻对不同磷浓度生理响应的比较研究[J].水生生物学报,2007,31(5):693-699. (TAN Xiang,SHEN Hong,SONG Lirong,et al. Comparative studies on physiological responses at phosphorus stress of three waterbloom-forming cyanobacteria[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2007,31(5):693-699. (in Chinese))
- [13] 吕昌伟,何江,毛海芳,等.乌梁素海和岱海的水-沉积物系统中有机磷分布特征[J].农业环境科学学报,2010,29(3):541-545. (LUY Changwei,HE Jiang,MAO Haifang,et al. Distribution characters of organic phosphorus in the overlying water-sediment system of the Wuliangsu Hai and Daihai in the Inner Mongolia Plateau,China[J]. Journal of Agro-Environment Science,2010,29(3):541-545. (in Chinese))
- [14] 孙静,王圣瑞,曾清如,等.洱海表层沉积物有机磷形态分布特征及其影响因素[J].环境科学研究,2011,24(11):1226-1232. (SUN Jing,WANG Shengrui,ZENG Qingru,et al. Distribution characteristics of organic phosphorus fractions and influencing factors in surface sediments of Lake Erhai[J]. Research of Environmental Sciences,2011,24(11):1226-1232. (in Chinese))
- [15] 苏玉萍,林佳,何灵,等.福建省山仔水库沉积物磷对水体磷浓度贡献的估算[J].湖泊科学,2008,20(6):748-754. (SU Yuping,LIN Jia,HE Ling,et al. Calculation of the contribution of the sediment phosphorus to the phosphorus concentration of the water body of Shanzi deep reservoir in Fujian Province[J]. Journal of Lake Sciences,2008,20(6):748-754. (in Chinese))
- [16] JIN Xiangcan,WANG Shengrui,PANG Yan,et al. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake,China[J]. Environmental Pollution,2006,139:288-295.